

文章编号: 1007-4619 (2002) 06-0412-04

目标分解技术在植被覆盖条件下土壤水分计算中的应用

施建成, 李震, 李新武

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 目标分解技术利用协方差矩阵的特征值和特征矢量, 将极化雷达后向散射测量值分解为单向散射、双向散射和交叉极化散射三个分量, 并建立了植被覆盖地表的一阶物理离散散射模型。通过分解的各分量与该模型比较, 建立重轨极化雷达测量数据估算土壤水分的方法。采用 Washita'92 实验区多时相全极化 L 波段 JPL/AIRSAR 图像雷达测量数据, 利用分解的散射测量值, 我们评估了在同一入射角, 单频(L波段)、多路条件下, 分解理论在进行土壤水分估计时减小植被影响的能力。结果表明利用目标分解理论和重轨极化雷达数据可以估算植被覆盖区域土壤水分的变化情况。

关键词: 分解技术; 极化雷达; 土壤水分; 植被覆盖

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引言

近年来, 理论模拟和野外实验奠定了主动微波遥感测量土壤物理属性的基础。多种地形和土地覆盖条件的应用证明了微波遥感可以估计地表层约 5cm 深度土壤水分^[1]。尽管前景可观, 但应用到水文和农业科学中植被层和表面粗糙度的变化显著影响雷达后向散射对土壤水分的灵敏度。

虽然在 20 多年前, 实验就已经证明雷达对土壤水分变化十分灵敏^[2], 但是可操作的土壤水分分布制图的算法还没有发展起来, 主要原因就是由于表面粗糙度和植被覆盖的影响。雷达后向散射反演土壤水分信息在能获取多极化雷达数据以后变得更为有效。用双极化 L 波段雷达数据和三极化雷达测量进行裸露土壤水分反演的几个定量的算法已经提出^[3-6]。然而, 所有这些算法只考虑了表面散射, 它们用不同极化特征进行权重组合来减小表面粗糙度的影响, 使得土壤水分可以直接从雷达数据得到。显然, 当我们将裸露土壤表面水分反演的算法应用到有植被覆盖的区域时, 植被覆盖将引起土壤水分

的过低估计和表面粗糙度的过高估计。

在本研究中, 用多时相全极化 L 波段雷达测量数据, 我们评估了分解理论在植被覆盖区域估算土壤水分的应用。用 JPL/AIRSAR 图像数据, 根据分解的散射测量值, 我们评估了在同一入射角, 单频(L波段)、多路条件下, 分解理论在进行土壤水分估计时减小植被影响的能力。

2 目标分解技术方法

利用协方差矩阵的特征值和特征矢量, 根据不同散射机制的类型, 可以将极化雷达后向散射测量值分解为 3 个分量: (1) 单向散射; (2) 双向散射; (3) 交叉极化散射。植被覆盖条件下, 单向散射主要包括植被的体散射、地表散射和穿透植被的散射量; 双向散射是地表和植被间相互作用项, 即所谓的二次反射散射项(double-bounce scattering); 交叉极化散射项主要是漫反射和多次交互作用散射项。它可以表示为^[7]:

$$T = \lambda_1 K_1 K_1^{*T} + \lambda_2 K_2 K_2^{*T} + \lambda_3 K_3 K_3^{*T} \quad (1)$$

其中 λ 和 K 为特征值和特征向量。* 是共轭操作

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 49989001, 40001015)和中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-312, CX000019)资助。

作者简介: 施建成(1955—), 男, 中国科学院遥感应用研究所特聘研究员。1991 年获美国加州大学博士学位, 现为加州大学圣巴巴拉分校副研究员。一直从事微波遥感的模型反演和应用研究。发表论文 60 余篇, 其中 SCI, EI 收录 40 余篇。

符, T 是矢量转置操作符。下标 1, 2, 3 分别代表分解的单向、双向和交叉散射分量。

目标分解技术可以从不同极化雷达测量数据中分离出后向散射系数的单向、双向和交叉散射分量。图版 I 图 1 显示了利用目标分解技术对实验区的雷达功率图、VV 极化和 HH 极化图像分解得到的单向、双向和交叉散射分量的彩色合成图。从图版 I 图 1 中, 我们可以看到单向散射占主要部分, 其次为双向散射量, 交叉散射所占比例较小。在 VV 极化分解图中, 双向散射作用比 HH 极化要强, 并且部分单向散射在 HH 极化分量中及其微弱。

3 后向散射模拟分量和分解的散射分量的关系

考虑一般自然植被表面的情况, 我们建立了离散植被的一阶物理散射模型, 这个模型可以写为:

$$\sigma_{pp}^{pp} = f_v \sigma_v^{pp}(\theta) + f_s \sigma_{sv}^{pp}(\theta) + f_s \sigma_s^{pp}(\theta) L_{pp}^2 + (1 - f_v) \sigma_s^{pp}(\theta) \quad (2)$$

其中 f_v 为一个给定像素的植被覆盖分形, $L_{pp}^2 = \exp(-2\kappa_e^{pp} d \sec(\theta))$ 是双程衰减因子。 κ_e 是依赖于极化的体消光系数, d 是植被层厚度, θ 是雷达入射

角。下标 pp 代表 VV 或 HH 极化状态。下标 t, v, s 和 sv 分别是总、体、面和面体交互作用项。(2) 式中直接的体散射和面-体交互作用项可以写为:

$$\sigma_v^{pp}(\theta) = 0.5 \kappa_s^{pp} (1 - L_{pp}^2) / \kappa_e^{pp} \quad (3)$$

$$\sigma_{sv}^{pp}(\theta) = 2 \kappa_s^{pp} d R_{pp} L_{pp}^2 \quad (4)$$

其中 κ_s^{pp} 是体散射系数, R 是表面反射率。两者都随极化参数 pp 变化而变化。

公式(2)的优点在于它代表了自然表面的一般情况。它可以应用到多种植被覆盖条件的地表表面, 当 $f_v = 1$, 为连续层状植被覆盖; 当 $f_v = 0$, 为裸露地表面。

由于体消光系数和散射系数强烈依赖于植被层的密度、形状和大小参数, 也依赖于植被冠层的方向、结构和冠层厚度, 因此, 从有限的雷达测量数据来估算表面散射分量将是极其困难的。

比较公式(2)中后向散射分量和公式(1)中分解的散射分量, 可以近似的将单向散射和双向散射表示为:

$$\sigma_1^{pp}(\theta) \approx f_v \sigma_v^{pp}(\theta) + \sigma_s^{pp}(\theta) (1 - f_v + f_v L_{pp}^2) \quad (5)$$

$$\sigma_2^{pp}(\theta) = f_s \sigma_{sv}^{pp}(\theta) \quad (6)$$

其中下标 1 和 2 代表单向和双向散射分量。

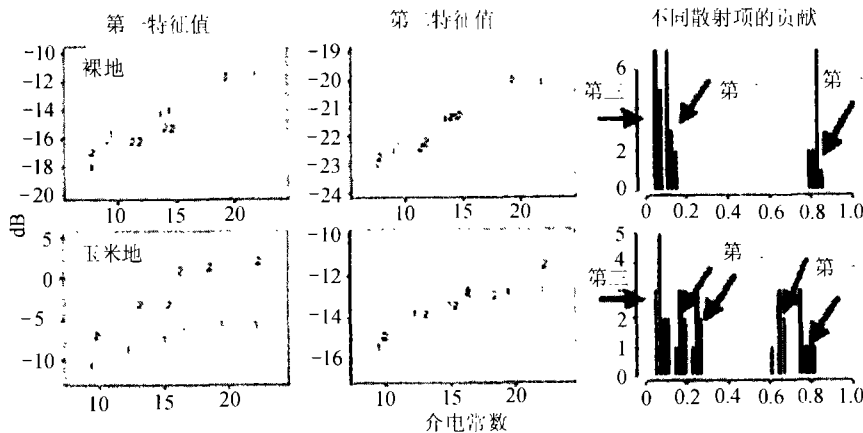


图 2 单向和双向散射分量对实验区裸地和玉米地后向散射总量的贡献及相互关系
Fig. 2 The relationship between dielectric constant and backscattering for different eigenvalues at bare fields and corn fields, and the scattering contribution of three different scattering terms

比较实验区非植被和植被覆盖条件下(裸地和玉米地)其单向散射和双向散射分量随介电常数变化的结果表明, 裸地的后向散射主要是单向散射, 双向散射和交叉散射所占比例较小, 且所选两个不同类型的裸地的单向和双向散射分量中, 介电常数和散射分量都有很好的关系; 植被覆盖地区的后向散射主要是单向散射, 双向散射分量相对增加, 交叉散射分量较少, 不同植被覆盖状况下, 单向散射分量表

现出不同的关系, 而双向散射分量关系相同, 并与介电常数有很好的相关关系(图 2)。

4 多时相测量配置下的数据分析

通常, 表面粗糙度和植被层的变化比土壤水分变化具有更长的时间尺度。如果没有人为的活动, 我们可以假设表面粗糙度和植被覆盖在几天到一个

星期的时间间隔内是相同的。在这种条件下,利用重复轨道方法测量的变化主要是来源于地表介电特性或土壤水分的变化,用重轨极化雷达测量,我们可以将第一分量的差写为:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^{pp1} - \sigma_{11}^{pp2} &= (\sigma_s^{pp1} - \sigma_s^{pp2})(1 - f_v + f_v L_{pp}^2) \\ &= \sigma_{11}^{pp1}(1 - \sigma_s^{pp2}/\sigma_s^{pp1})(1 - f_v + f_v L_{pp}^2)\end{aligned}\quad (7)$$

由公式(6)和(4),第二个分量的比值写为:

$$\sigma_2^{pp2}/\sigma_2^{pp1} = R_{pp2}/R_{pp1}\quad (8)$$

其中上标和下标 pp 后的数字代表了第一和第二次测量。因此,利用式(8)分解的双向反射分量,我们能分解或直接估计相对的表面反射率或土壤水分的变化。

本研究中用的数据来源于 Washita'92 实验。Washita'92 实验是 NASA、USDA 及一些政府机构和大学组织的大型联合实验,目的是验证一些遥感水文模型及其算法,实验收集了一些如土壤水分、蒸散通量等水文数据的空间分布^[8]。在 1992 年 6 月 10-18 日的实验期间,时间序列的土壤水分和蒸散通量等地表实测水文数据被收集。同时,安装在 NASA DC-8 飞机上的 AIRSAR 传感器收集了在实验区测试地点 6 个时间序列的 L 波段雷达数据。Washita'92 实验从 6 月 9 日暴雨结束以后,开始一系列的实验观测,从那以后在 AIRSAR 飞行期间没有降雨过程。图版 I 图 3 中,6 月 10 日是实验区 SAR 的 VV, HH 和 HV3 种极化状态的合成图像,6 月 12 日到 6 月 18 日的 5 幅图像都是 SAR 的 VV 极化图像与 6 月 10 日图像的差值。从图版 I 图 3 中可以看出,随时间的变化,后向散射逐渐变小,差值逐渐变大,部分地区尤其显著,反映出地表是一个逐渐变干的过程。

从 6 个序列雷达测量中的任何两个时间数据,用公式(8)中分解的双向反射分量的比值,我们能够估计相对的表面反射变化。

图版 I 图 4 是归一化的 HH 和 VV 极化分解的双向散射分量叉积比较。以公式(8)左边第一天测量的归一化值作为 y 轴,以公式(8)右边表面反射率的归一化叉积作为 x 轴。这些数据来源于两块玉米地,实测了在实验期间的土壤水分数据,表面反射率从土壤水分和土壤组分信息计算。我们可以看到,它们非常接近于 1:1。其相关系数达到 0.93, RMSE 是 0.42dB。它表明公式(8)可以直接用来估

计土壤水分变化和植被表面的幅度。

5 结论

(1) 通过研究表明,裸地的后向散射主要是单向散射,双向散射和交叉散射所占比例较小,介电常数和散射分量有很好的关系;植被覆盖地区的后向散射主要是单向散射,双向散射分量相对增加,交叉散射分量较少,不同植被覆盖状况下,单向散射分量表现出不同的关系,而双向散射分量关系相同,并与介电常数有很好的相关关系。

(2) 利用目标分解技术能够分离出植被的散射部分,提供了一个监测表面土壤水分,特别是在中等植被覆盖表面的有力工具。该方法简单实用,可直接用于估算土壤水分的相对变化。

(3) 综合分解技术,利用重轨极化雷达数据可以估算植被覆盖区域土壤水分的变化情况,且不需要了解植被覆盖的任何信息。

参 考 文 献 (References)

- [1] Engman E T, N Chauhan. Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing[J]. *Remote Sensing Environ.*, 1995, **51**(1):189—198.
- [2] Ulaby F T. Active Microwave Determinations of Soil Moisture in Vol. II, Manual of Remote Sensing[M]. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 1975.
- [3] Dubois P C, Van Zyl J J, Engman E T. Measuring Soil Moisture with Imaging Radar[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1995, **33**(4): 195—926.
- [4] Ulaby F T. Fundamentals of Applied Electromagnetics[M]. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [5] Shi J J, Wang A, Hsu P O'Neill, et al. Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameters Using L-band SAR Image Data[J]. *IEEE Transactions on Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(5): 1254—1266.
- [6] Sarabandi Oh Y K, Ulaby F T. An Empirical Model and Inversion Technique for Radar Scattering from Bare soil Surface[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, **30**(2):370—381.
- [7] Cloude S R, Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry, in Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry[M]. Part I, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992.
- [8] Jackson T J, Le Vine D M, Swift C T, et al. Large Scale Mapping of Soil Moisture Using the ESTAR Passive Microwave Radiometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **53**:27—37.

Evaluate Usage of Decomposition Technique in Estimation of Soil Moisture with Vegetated Surface by Multi-Temporal Measurements Data

SHI Jian-cheng, LI Zhen, LI Xin-wu

(*Lab. of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China*)

Abstract: During recent years, theoretical modeling and field experiments have established the fundamentals of active microwave remote sensing as an important tool in determining physical properties of soil. But, its application to hydrological and agricultural sciences has been hampered by natural variability and the complexity of the vegetation canopy and surface roughness that significantly affect the sensitivity of radar backscattering to soil moisture. Vegetation cover will cause an under-estimation of soil moisture and an over-estimation of surface roughness when we apply the algorithm for bare surface soil moisture estimation to vegetation covered regions.

A polarimetric SAR backscatter measurements, by using eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix, can be decomposed into three components based on the scattering types: an odd number of reflections, an even number reflections, and a cross-polarized scattering power. This decomposition technique allows us to obtain the estimation of single and double reflection components of backscattering coefficients for VV and HH polarization.

In this study, we evaluate the usage of the decomposition theory in application of estimating soil moisture for vegetated surface with the temporal fully polarimetric L-band SAR measurements. Using the decomposed scattering measurements from JPL/AIRSAR image data, we evaluated their usage to reduce the vegetation effect on estimation soil moisture under configurations of a single-frequency (L-band) and multi-pass with a same incidence. The results indicate the decomposition technique can be used to estimate the soil moisture change and their magnitudes for vegetated surface, it provide a powerful tool for monitoring surface soil moisture, especially with the moderate vegetated surface.

Key words: decomposition technique; polarimetric radar; soil moisture; vegetated surface

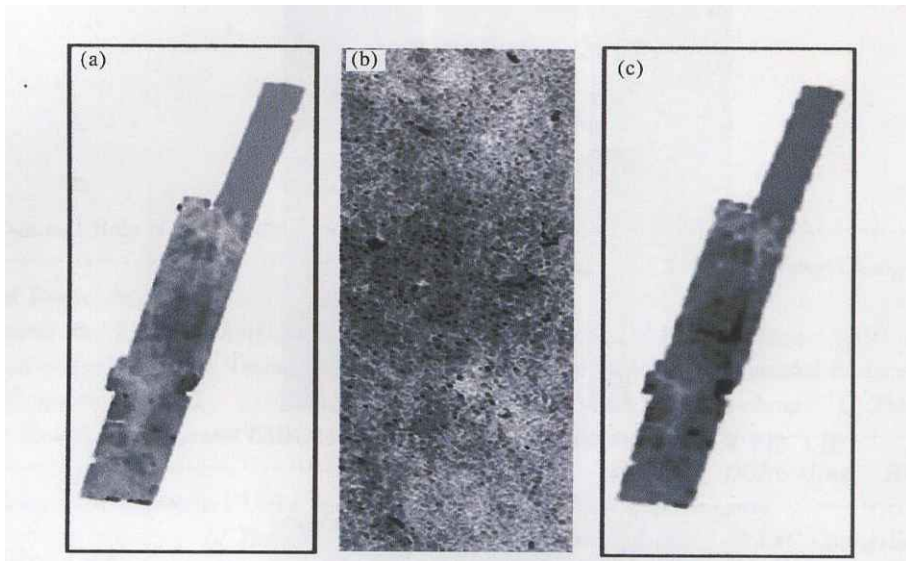


图 2 实验区 1997-06-25 计算的地表反射系数 (a), 后向散射总量 (b) 和体散射项 (c)

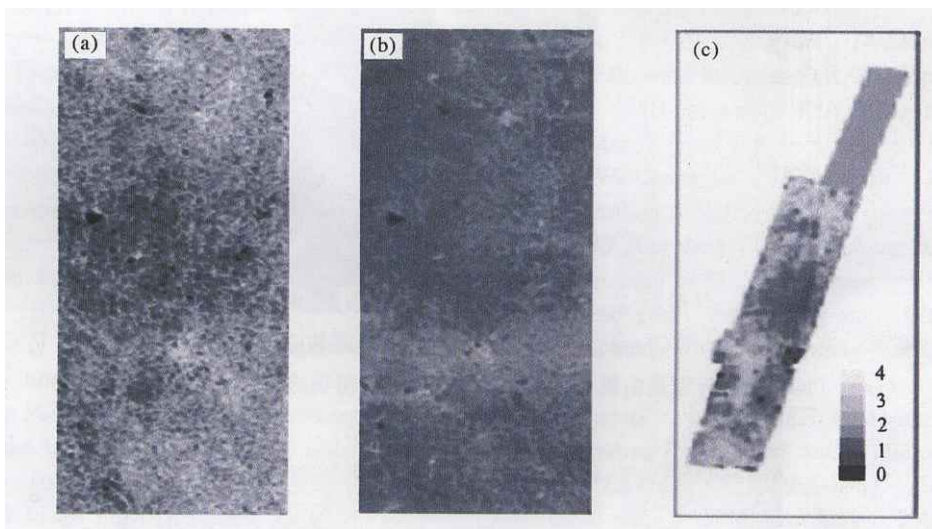


图 3 实验区 1997 年 6 月 28 日, 7 月 5 日的 Radarsat 图像及其土壤水分的变化

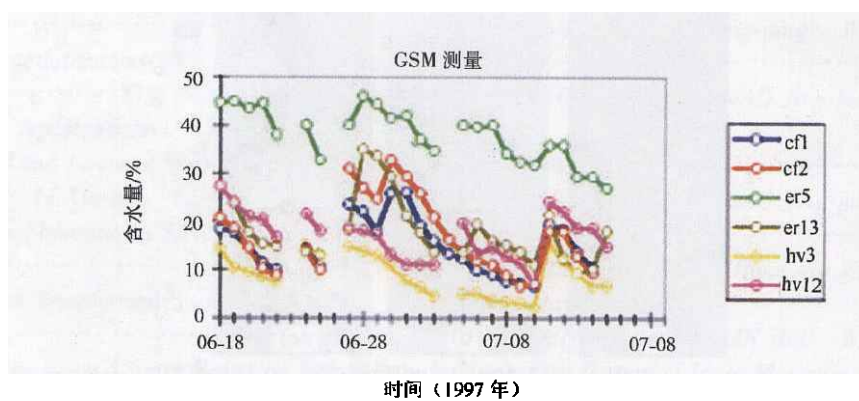


图 4 实验区实测地表土壤水分变化曲线

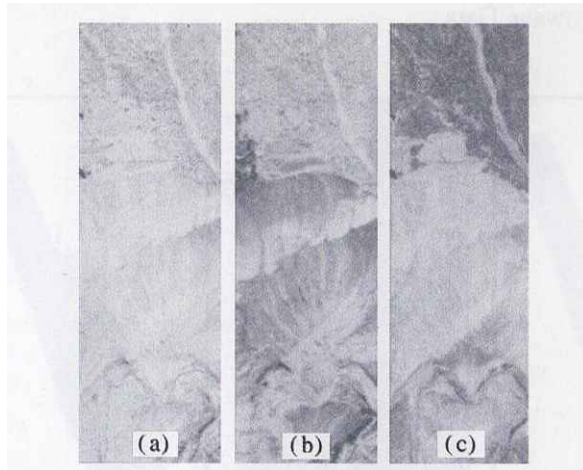


图 1 相干系数图 ((a) HH-HH; (b) HV-HV; (c) HH-VV)

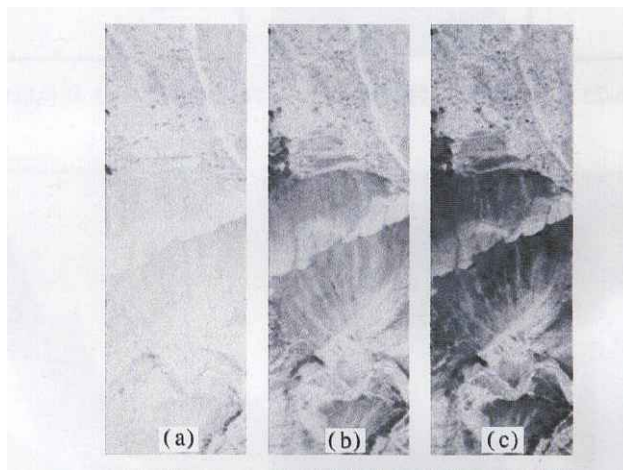


图 2 用 Clouds 相干最优算法得到相干系数图
((a)、(b)、(c) 分别是由第一、第二、第三特征值得到的相干系数图)

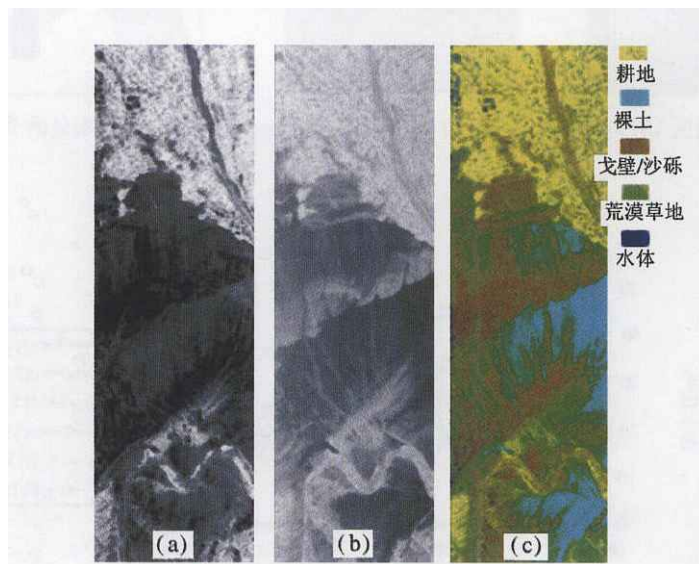


图 3 (a) 1994-10-09 的熵值图;
(b) 1994-10-09 的 HV 后向散射系数图;
(c) 极化干涉 SAR 数据分类结果图